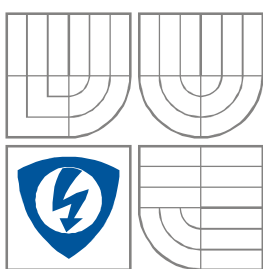


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNologiÍ**

**ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY  
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC  
TECHNOLOGY**

# **NÁVRH A OVĚŘENÍ FUNKCE JEDNODUCHÉHO DVOUSTUPŇOVÉHO OPERAČNÍHO ZESILOVAČE**

**DESIGN AND FUNCTION VERIFICATION OF SINGLE TWO-STAGE  
OPERATIONAL AMPLIFIER**

**BAKALÁŘSKÝ PROJEKT  
BACHELOR'S PROJECT**

**AUTOR PRÁCE  
AUTHOR**

**Petr Pavelka**

**VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR**

**Doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**

**BRNO, 2010**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Mikroelektronika a technologie

**Student:** Petr Pavelka  
**Ročník:** 3

**ID:** 108026  
**Akademický rok:** 2009/10

## NÁZEV TÉMATU:

**Návrh a ověření funkce jednoduchého dvoustupňového operačního zesilovače**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte důkladně problematiku návrhu operačních zesilovačů v technologii CMOS. Zaměřte se zejména na nízkopříkonové systémy. Na základě studia navrhnete vhodné parametry pro dvoustupňovou strukturu operačního zesilovače, která bude splňovat požadované parametry a simulací ověříte splnění požadavků zadání.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:


Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 3.6.2010

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

  
prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.  
předseda oborové rady



## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt:**

Práce se zabývá návrhem a ověřením funkce jednoduchého dvoustupňového operačního zesilovače v CMOS technologii.

This work deals with design and verification of simple two-stage operational amplifier in CMOS technology.

## **Klíčová slova:**

Jednoduchý dvoustupňový operační zesilovač, návrh a ověření funkce, počítačová simulace

Simple two-stage operational amplifier, design and verification, computer simulation

## **Bibliografická citace**

Pavelka, P. Návrh a ověření funkce jednoduchého dvoustupňového operačního zesilovače. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 38s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

# Prohlášení

Prohlašuji, že svůj semestrální projekt na téma Návrh a ověření funkce jednoduchého dvoustupňového operačního zesilovače jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedeného semestrálního projektu dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 2. června 2010

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu doc. Ing. Jiřímu Házemu, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 2. června 2010

.....  
podpis autora

## Obsah

Úvod .....	6
<b>1 Historie .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 Prvopočátky OZ .....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 Současný trend .....</b>	<b>8</b>
1.2.1 Návrh úplného rozdílového dvoustupňového CMOS OZ pro velký zisk s velkou šířkou pásma .....	9
1.2.2 Nízkonapěťový kompatibilní dvoustupňový OZ se zesílením $\geq 120$ dB .....	10
1.2.3 Návrh dvoustupňového OZ .....	10
1.2.4 Návrh úplného rozdílového dvoustupňového OZ .....	11
1.2.5 Návrh zákaznického dvoustupňového OZ s jednotkovým zesílením a velkým dynamickým rozsahem na výstupu .....	11
<b>1.3 Vývojové trendy v CMOS oblasti .....</b>	<b>12</b>
<b>1.4 Základní rozdělení OZ .....</b>	<b>14</b>
<b>2 Teoretické znalosti potřebné k návrhu OZ .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Základní požadavky na OZ .....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Fázová rezerva .....	16
<b>2.2 Blokové zapojení OZ .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Základní zapojení dvoustupňového OZ .....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Hlavní části dvoustupňového OZ .....</b>	<b>18</b>
2.4.1 První stupeň .....	18
2.4.2 Druhý stupeň .....	19
<b>2.5 Určení vhodné kompenzace .....</b>	<b>20</b>
2.5.1 Millerova kapacita .....	20
2.5.2 Samokompenzace .....	21
2.5.3 Kladná zpětná vazba .....	21
<b>2.6 Teoretický postup při navrhování .....</b>	<b>22</b>
<b>3 Teoretický návrh OZ .....</b>	<b>25</b>
<b>4 Ověření funkce navrženého OZ .....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 DC analýza a vstupní napěťová nesymetrie .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 Rychlost přeběhu .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3 Šířka pásma, zisk a fázová rezerva .....</b>	<b>33</b>
4.3.1 Šířka pásma .....	34
4.3.2 Fázová rezerva a zisk .....	34
<b>5 Závěr .....</b>	<b>37</b>

<b>6</b>	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>38</b>
----------	---------------------------------------	-----------

# Úvod

Práce pojednává o návrhu a ověření funkce dvoustupňového operačního zesilovače (OZ) v technologii CMOS. V současnosti patří OZ k nejpoužívanějším elektronickým součástkám. Jedná se o stejnosměrný širokopásmový zesilovač s velkým zesílením a s použitím vhodné zpětné vazby umožňují zrealizovat nespočetné množství aplikací. Tyto aplikace mohou být jak lineární, tak nelineární. Operační zesilovač je používán s různými pasivními nebo aktivními součástkami, které tvoří celek. Tento celek je potom nazýván operační sítí. Operační zesilovače umožňují konstruovat různé obvody nejen pro matematické operace, pro které byly zprvu navrženy, ale i kvalitní zesilovače pro různá určení, jako jsou třeba oscilátory nebo regulátory. Další použití je ve sdělovací nebo číslicové technice.

# 1 Historie

V této kapitole jsou přiblíženy počátky a realizace prvních operačních zesilovačů, které byly realizovány vakuovými elektronkami. Dalšími kroky byly první OZ v pouzdře a také první FET zesilovače zasahující do 80. let 20. století. V neposlední řadě budou zmíněny vývojové trendy a také základní rozdělení OZ.

## 1.1 Prvopočátky OZ

První OZ byly konstruovány jako vakuové elektronky, které v pozdějších letech prošly vývojem až na diskretní polovodičové součástky. V současné době jsou OZ zhotoveny v podobě integrovaných obvodů, které v sobě sdružují i několik takovýchto OZ v jednom pouzdře. Roku 1941 byl vyvinut první sumarizační zesilovač Karlem D. Swartzelem z Bellových laboratoří. Skládal se ze 3 vakuových elektronek se zesílením 90 dB a operačním napětím  $\pm 350$  V. Toto řešení mělo jednoduchý invertující vstup namísto diferenciálních invertujících a neinvertujících vstupů, které jsou mnohem více používány v dnešní době. Roku 1947 byl vyvinut první OZ s neinvertujícím vstupem, který byl navržen Loebem Juliem. Tento zesilovač měl dvě významné inovace. Vstupní stupeň používal triodový pár s odpovídající zátěží na redukci posunu na výstup. Mnohem důležitější inovací bylo, že to byl první OZ se dvěma vstupy. Jeden vstup byl invertující a druhý neinvertující. Edwin A. Goldberg navrhl první operační zesilovač se stabilizačním měničem (chopper-stabilized) a to v roce 1949. Zapojení využívalo normálních operačních zesilovačů s přídatným AC zesilovačem. Tento zesilovač získával střídavý signál ze stejnosměrného signálu přepínáním mezi stejnosměrným napětím a zemí v poměru 60-400 Hz. Tento signál byl zesílen, usměrněn, vyfiltrován a odeslán do OZ na neinvertující vstup. Tímto se obrovsky zvětšilo zesílení. Bohužel jakýkoliv návrh, který používal toto zapojení již dále nebyl schopný použít jeho neinvertující vstup pro další účely. Tyto OZ používající neinvertující vstup byly nepopulární až do šedesátých let, kdy začala éra integrovaných obvodů. V roce 1953 se s příchodem modelu K2-W konstruovaným Georgem A. Philbrickem se staly vakuové elektronky více komerční záležitostí. Zesilovače pracovaly na principu návrhu od Loeba Lulia z roku 1947. Rovněž pomohly k velkému rozmachu v průmyslu. První OZ jako diskretní součástky se datují na rok 1961. Obvykle používaly ručně výběrové rezistory pro



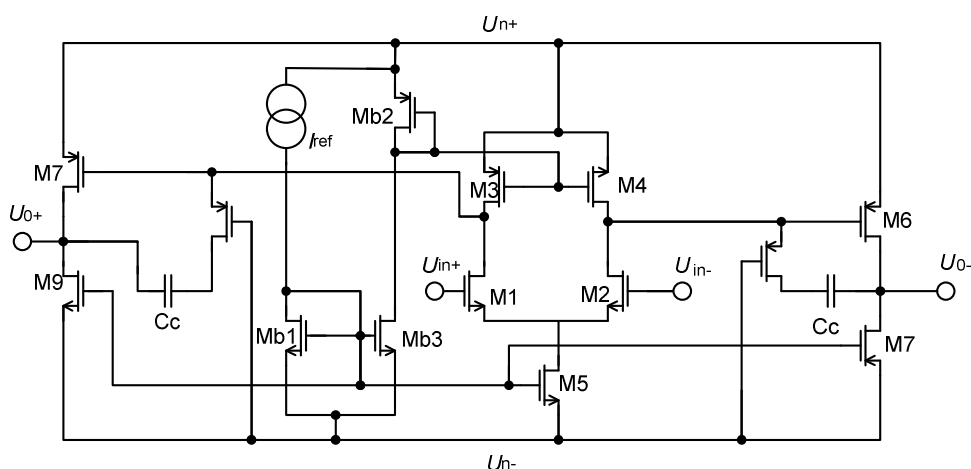
zlepšení napěťové nesymetrie a posunu. Model P54 z roku 1961 měl zesílení o hodnotě 94 dB a byl napájen  $\pm 15$  V. O rok později světlo světa spatřil první zalitý OZ modul. To přispělo k jednoduché montáži na desky plošných spojů. V roce 1963 Bob Widlar z Fairchild Semiconductor navrhl první monolitický OZ, který byl nazván  $\mu$ A702. Monolitické integrované obvody obsahují jednoduchý čip, který je opláštěný. Skoro všechny dnešní OZ jsou řešeny tímto způsobem. Popularitu také získal monolitický OZ pod označením LM101 z roku 1967. O rok později se OZ  $\mu$ A741 stává všudypřítomným a nabývá na velké popularitě. Operační zesilovač  $\mu$ A741 byl velice podobný LM101, až na to, že do něj byla integrována kompenzační kapacita o hodnotě 30 pF. Model  $\mu$ A741 je stále ve výrobě a i díky tomu se stal všudypřítomným v elektrotechnice. Další inovace v oblasti operačních zesilovačů byly zaznamenány v roce 1966 s vývojem diodového můstku u OZ. Tato aplikace měla velmi malý vstupní proud a jsou stále nejvíce dostupné z hlediska potlačení soufázového signálu se schopností přesně přerozdělit stovky voltů na jejich vstupech. V sedmdesátých letech začala éra vysoce rychlých zesilovačů s nízkým vstupním proudem. Je to tzv. FET návrh. V další fázi byly tyto zesilovače velkou měrou nahrazeny technologií MOSFET. Tomu se tak dělo v osmdesátých letech[15], [16].

## 1.2 Současný trend

V posledních letech je snahou snižovat napájecí napětí. Napájecí napětí  $\pm 5$  V se stalo běžným napájecím napětím. Pro maximalizování rozsahu signálu u moderních OZ jsou tzv. rail-to-rail vstupy. To jsou vstupy, které mohou mít rozsah od malých napětí až po vysoké. Někdy jsou použité i na výstupy. Dále v této kapitole budou přiblíženy příklady OZ v řešených projektech, ze kterých bylo také čerpáno pro odvození teoretických hodnot v této práci. Autoři převážně řešili podobné OZ s použitím podobných počátečních parametrů. Každý z autorů používal odlišné metody výpočtů k odvození potřebných hodnot poměrů šířky a délky kanálu tranzistorů.

## 1.2.1 Návrh úplného rozdílového dvoustupňového CMOS OZ pro velký zisk s velkou šířkou pásma

Tento návrh se zabýval návrhem dvoustupňového OZ s využitím RC Millerovy kompenzace. Obr. 1.1 ukazuje obvodové řešení. Návrh dvoustupňového OZ se zabývá řešením, které používá první stupeň zapojený pro velký zisk a druhý stupeň pro velký rozkmit. Pro první stupeň byl vybrán jednoduchý rozdílový zesilovač na vstup a na výstup zapojení se společným sourcem. Kompenzace byla řešena pomocí RC Millerovy kompenzace. Jedná se o sériové zapojení  $R$  a  $C$  [17].



Obr. 1.1 Schéma zapojení

Tab. 1.1 Tabulka navrhovaných hodnot

specifikace	hodnoty
napájení $U_{DD}$	3,3 V
zatěžovací kapacita $C_L$	1 pF
spotřeba $P_{diss}$	$\leq 2,5$ mW
DC zesílení $A$	95 dB
šířka pásma $GBW$	$\geq 130$ MHz
fázová rezerva $\phi$	$\geq 55^\circ$
rychlost přeběhu $SR$	$\geq 100$ V/ $\mu$ s
$ICMR$	$\geq 1,5$ V

### 1.2.2 Nízkonapěťový kompatibilní dvoustupňový OZ se zesílením $\geq 120$ dB

Projekt se zabýval nízkonapěťovým OZ v technologii CMOS. Toto řešení má 4 a více tranzistorů mezi napětími  $U_{DD}$  a  $U_{SS}$ . Konstrukce je schopna dosáhnout stejnosměrného zesílení  $\geq 120$  dB a fázové rezervy  $PM \geq 56^\circ$  při napájení  $U_{DD} = 3,5$  V se šířkou pásma  $\geq 120$  MHz. Hlavním tématem návrhu bylo řešení nové architektury s vhodnou nízkonapěťovou strukturou návrhu. Tato architektura obsahuje maximálně tři tranzistory mezi napájecími napětími  $U_{DD}$  a  $U_{SS}$ . V prvním stupni je využita technologie kladné zpětné vazby na posílení vstupní impedance a zisku a ve druhém stupni je použita řízená kapacita [19].

### 1.2.3 Návrh dvoustupňového OZ

Návrh ukazuje jednu metodu výpočtů pro realizaci a ověření funkčnosti jednoduchého OZ. Jedná se o základní zapojení dvoustupňového OZ, které je v prvním stupni zapojené jako rozdílový zesilovač převádějící vstupní rozdílové napětí na rozdílový proud. Druhý stupeň je potom řešen zapojením se společným source, který převádí na výstupu napětí na proud [1].

Tab. 1.2 Hodnoty dvoustupňového OZ

specifikace	hodnoty
zesílení $A$	$> 3000$ V/V
šířka pásma $GBW$	5 MHz
$U_{DD}$	2,5 V
$U_{SS}$	- 2,5 V
zatěžovací kapacita $C_L$	10 pF
výstupní rozsah $U_{OUT}$	$\pm 2$ V
$ICMR$	- 1 do 2 V
rychlost přeběhu $SR$	$> 10$ V/ $\mu$ s
spotřeba $P_{diss}$	$\leq 2$ mW

### 1.2.4 Návrh úplného rozdílového dvoustupňového OZ

Hlavním úkolem projektu bylo navrhnout úplný dvoustupňový OZ pro menší výkon než byl určen v teoretických parametrech. Toto by měl návrh dovolit za předpokladu vysokého vstupního rozkmitu, který je přibližně roven  $2 \times 5 \text{ V } U_{DD}$ . Řešitel se zabýval vhodným návrhem, jak prvního stupně, který mohl řešit buď teleskopickou architekturou nebo složenou kaskodou, tak i druhého stupně. Z hlediska počtu použitých součástek použil řešitel variantu teleskopickou. V této metodě jsou použity pouze čtyři tranzistory v signálové větvi oproti složené kaskodě, kde jich je zapotřebí šest. Návrh se čtyřmi tranzistory je výhodnější jak z hlediska menšího signálového šumu, tak i z hlediska menší spotřeby energie. Ve druhém stupni jsou uvažovány rovněž dvě možnosti. Jednou je klasické zapojení se společným sourcem, které má vynikající vstupní rozsah  $U_{DD} = 2 \text{ V}$ , zatímco rozsah diferenčního páru je  $U_{DD} = 3 \text{ V}$ . Protože každý stupeň přispívá nízkou frekvencí do celkové přenosové funkce, je potřeba zajistit vhodnou kompenzační stabilitu a rychlost přenosu. Z toho důvodu je vhodnější použít velkou kompenzační kapacitu. V tomto návrhu byla pro první stupeň použita Millerova kompenzační kapacita spojená do série s nulovým RHP rezistorem. Ve druhém stupni je použita kapacita mezi prvním kaskodovým uzlem v prvním stupni a výstupem z druhého stupně [21].

### 1.2.5 Návrh zákaznického dvoustupňového OZ s jednotkovým zesílením a velkým dynamickým rozsahem na výstupu

Návrh se zabýval plně zákaznický modifikovaným OZ s jednotkovým ziskem na zesílení a velkým dynamickým rozsahem na výstupu. Pro návrh tohoto OZ bylo charakteristické, že první stupeň byl s teleskopickou architekturou (viz obr. 1.2), který zajišťuje dostatečný zisk pro celý obvod a vyznačuje se i nízkou spotřebou. Druhý stupeň je běžný zdrojový, který zajišťuje vysoký výstupní rozkmit. Dále jsou v návrhu dva kapacitory mezi prvním a druhým stupněm z důvodu kaskádové kompenzace [10].



Tab. 1.3 Hodnoty OZ s reálnou strmostí

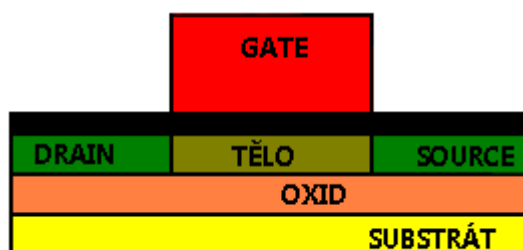
### 1.3 Vývojové trendy v CMOS oblasti

12

Není tomu jinak ani u technologie CMOS. Hlavními omezujícími faktory pro tuto technologii by se mohly především zdát

- minimální výrobitelné rozměry,
- klesající odezva ve výkonovém spínání,
- ztráty v závěrném směru.

Tyto faktory jsou hlavním problémem pro celou technologii. Hlavním problémem u minimálního rozměru byla jeho aplikace. Pro technologii výroby byla používána vlnová délka nejprve se 193 nm v ultrafialovém pásmu. Postupem času byla objevena možnost používat až extrémně ultrafialového záření s vlnovou délkou 13 nm. V této vlnové délce se vyskytl problém, protože velikost vlastní výrobní technologie nemůže být menší, než je velikost atomu a molekuly. V praktické rovině se vědci domnívají, že tato hranice se zastaví na hodnotě 22 nm. Hlavními zlepšujícími prvky v CMOS technologii by mohlo být používání nových materiálů. Do této skupiny je možné zařadit prvky, které jsou označeny malou dielektrickou konstantou (low-k dielektrika). Jsou to například dioxidy křemíku. Dalším jsou dielektrika s vysokou dielektrickou konstantou. Do této skupiny se řadí například křemičitan zirkoničitý. Dalším vylepšením by mohlo být navržení nové struktury. Do této kategorie mohou být zařazeny dvě základní struktury. Jedná se o tzv. SOI křemík na izolátoru a DGCMOS dvojité gate CMOS struktury. V prvním případě se jedná o vrstvu oxidu, která je vytvořena na substrátu, na tuto vrstvu oxidu jsou dále naneseny další vrstvy. Příklad tohoto řešení je na obr. 1.3.



Obr. 1. 3 SOI řešení

Druhé řešení je více experimentální, ale do budoucna by mohla přinést větší výhody. Hlavní teorií tohoto řešení je přidat do struktury jednu nebo více elektrod gate na zvětšení

elektrických vazeb mezi elektrodou gate a kanálem. Hlavním a zatím nevyřešeným problémem však zatím zůstává, kam implementovat další elektrody gate [13].

## 1.4 Základní rozdělení OZ

Jak již bylo řečeno, jsou operační zesilovače v podstatě stejnosměrně vázané diferenční zesilovače s velkým zesílením. Proto jsou rozdělovány do různých skupin, protože žádné reálné zapojení nikdy nebude schopné splnit všechny požadavky.

- 1) Univerzální OZ – tyto zesilovače se nejčastěji používají v takových aplikacích, kde na ně nejsou kladeny nadměrné požadavky z hlediska kvality. Proto můžeme jejich parametry označit za průměrné.
- 2) Přístrojové OZ – na zesilovače je kladen velký nárok na časovou stabilitu parametrů, protože se využívají v měřicích aplikacích pro malé napětí. Mají mít malé zbytkové napětí a velké zesílení.
- 3) Širokopásmové a rychlé OZ – slouží ke zpracovávání vysokých kmitočtů od 20 do 700 MHz a impulzů. Mají vysoký mezní kmitočet.
- 4) OZ pro velká vstupní napětí – na vstupu je možno dosáhnout až stovky voltů  $\pm (30 - 150 \text{ V})$ . V ostatních parametrech jsou stejné jako skupina první.
- 5) Speciální OZ – zesilovače v této skupině se vyznačují velmi malým příkonem a spotřebou. Také se sem dají zařadit OZ s příkonem do 1 W a výstupním proudem, který je větší jak 100 mA [8].

## 2 Teoretické znalosti potřebné k návrhu OZ

V této kapitole budou osvětleny základní postupy potřebné při návrhu OZ v technologii CMOS. Nejprve bude představeno základní blokové schéma OZ a posléze i základní zapojení a jeho teoretický návrh. V každém návrhu je nejdůležitější stanovit základní parametry OZ pro další výpočty.

### 2.1 Základní požadavky na OZ

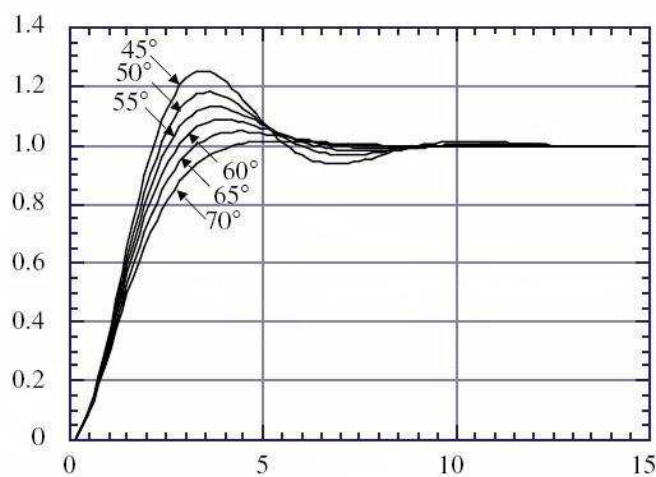
Návrh každého elektrického zařízení začíná stanovením základních specifikací. Proto je velice důležité si tyto hlavní parametry stanovit a ujasnit vlastní postup návrhu

- **Zesílení:** je proces, při kterém je zesílen vstupní signál. V elektrotechnice se nejčastěji mluví o zesílení napětěovém, proudovém, nebo výkonovém. Hlavním důvodem pro zesílení je požadavek větších výkonových parametrů.
- **Šířka pásma:** základní parametr, kde OZ nemá velké zkreslení. Jinými slovy může být šířka pásma nazvána jako pracovní oblast.
- **Rychlost přeběhu:** čas změny výstupního napětí, jakou dokáže OZ reagovat na skokovou změnu vstupního napětí. Čím větší je toto číslo, tím větší je přenášená šířka pásma a nižší nelinearita zkreslení.
- **Náběžná a sestupná hrana:** čas, který zabere signálu, než se dostane z 10 % hodnoty na 90 % a naopak.
- **CMRR:** činitel potlačení souhlasného rušení. Poměr mezi rozdílovým ziskem a souhlasným ziskem.
- **ICMR:** jedná se o vstupní napětěový rozsah. Je to napětěový rozsah na vstupu rozdílového zesilovače, pro který není vstup satureován.
- **Fázová rezerva:** jeho hodnota je důležitá z hlediska stability OZ. Všeobecně se doporučuje určit fázovou rezervu aspoň na 45° a v ideálním případě 60°. Platí, že čím větší je hodnota fázové rezervy, tím je systém stabilnější. Zároveň je potřeba brát v potaz, že čím větší hodnota tím rychleji také klesá čas odezvy. Průběhy fázové rezervy znázorňuje Obr. 2.1.
- **Spotřeba:** spotřeba elektrické energie na provoz zařízení či obvodu.



### 2.1.1 Fázová rezerva

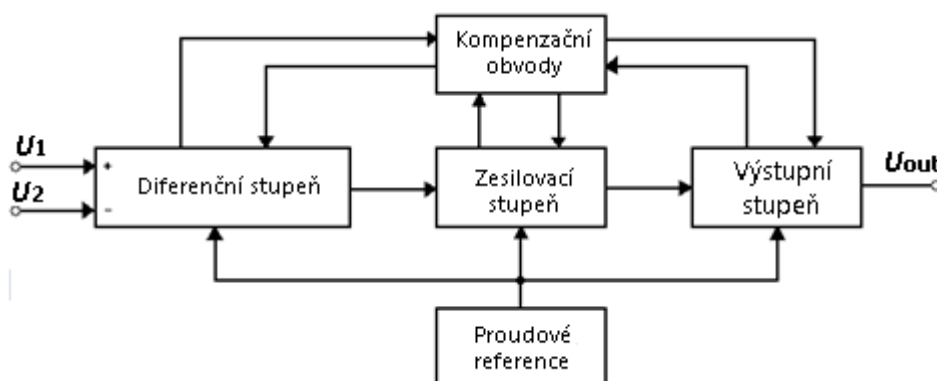
Dobrá fázová rezerva je taková, kde odezva dosáhne co nejrychleji konečné hodnoty. Proto se u fázové rezervy počítá s minimální hodnotou aspoň  $45^\circ$  raději však  $60^\circ$  [1].



Obr. 2.1. Fázová rezerva

## 2.2 Blokové zapojení OZ

Každý operační zesilovač je rozdělen do funkčních bloků, které plní svůj stanovený úkol. Propojení jednotlivých bloků je znázorněno na obr. 2.2

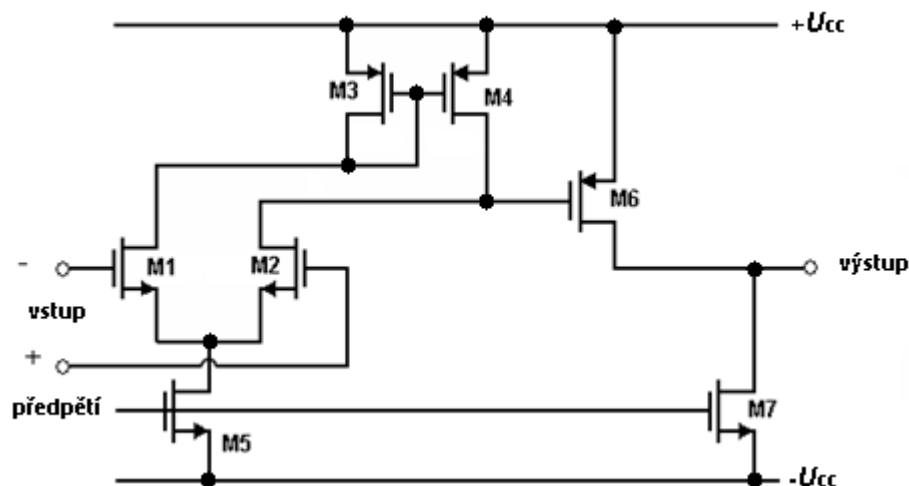


Obr. 2.2 Blokové schéma dvoustupňového OZ

- Diferenční stupeň – vstupní blok celého zapojení.
- Kompenzační obvody – tento blok je nutný pro celou stabilitu zesilovače.
- Proudové obvody – jejich úlohou je nastavení pracovního bodu OZ.
- Výstupní oddělovací stupeň – slouží k řízení malých odporů.

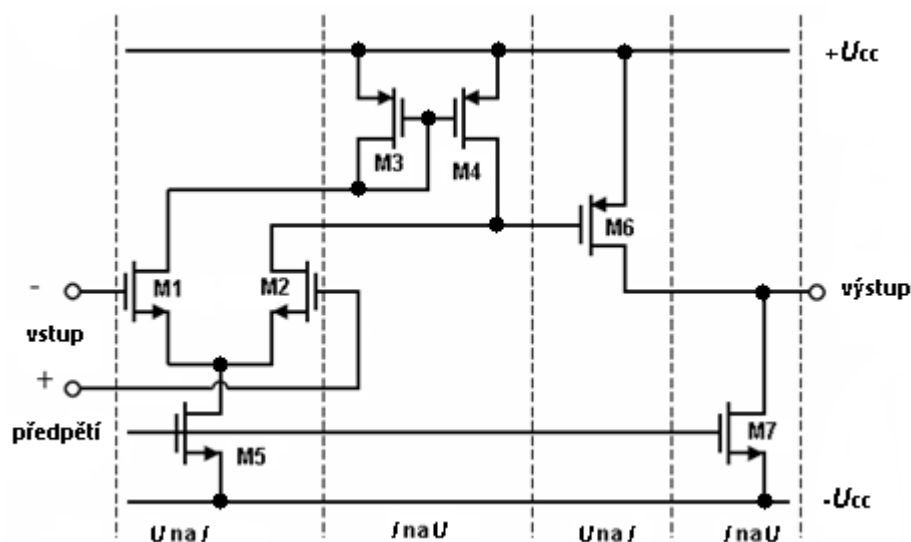
## 2.3 Základní zapojení dvoustupňového OZ

Na obr. 2.3 je základní zapojení OZ, ze kterého se bude odvíjet veškerý návrh. Nejprve je potřeba toto schéma rozdělit na funkční bloky. Rozdělení je patrné z obr. 2.4.



Obr. 2.3 Základní schéma dvoustupňového OZ

Vybraný obvod byl rozdělen na čtyři funkční bloky, které převádějí napětí na proud nebo opačně. Část převádějící napětí na proud je nazvána transkonduktanční a část převádějící proud na napětí je nazvána zátěží. Funkčnost jednotlivých bloků je znázorněna v tabulce 2.1 klasifikace jednotlivých stupňů.



Obr. 2.4 Rozdělení OZ na jednotlivé funkční bloky

## 2.4 Hlavní části dvoustupňového OZ

Dvoustupňový OZ bude rozdělen na dva funkční bloky. V tomto případě se jedná o první stupeň, který je realizovaný pomocí rozdílového zesilovače skládajícího se ze dvou tranzistorů. K diferenčnímu páru jsou připojeny další dva tranzistory v modifikaci proudového zrcadla. Druhý stupeň je realizován třemi tranzistory se zapojením ziskového stupně.

### 2.4.1 První stupeň

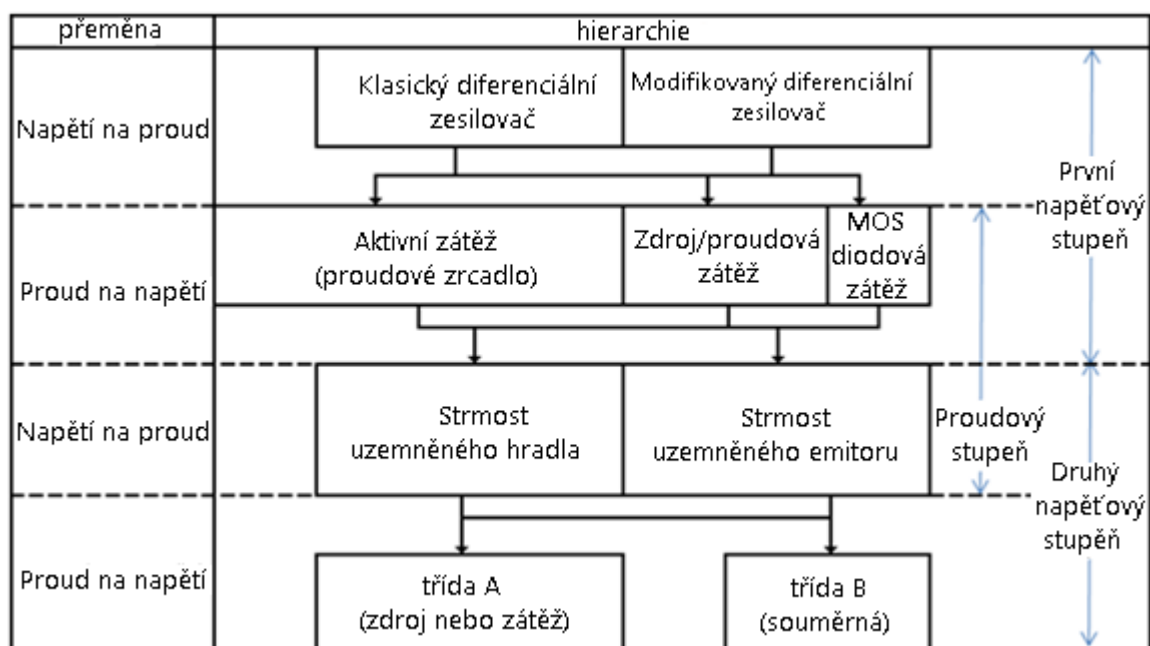
První stupeň je zapojen jako rozdílový zesilovač, který se skládá ze dvou tranzistorů. Tranzistory M1 a M2 mají shodně vodivost typu N (mohou být i s vodivostí typu P). Hlavní funkcí rozdílového zesilovače je zesilovat rozdílový vstupní signál a co nejvíce potlačovat souhlasnou složku vstupního signálu. Zároveň je na tranzistor M1 přiveden vstup invertující a na tranzistor M2 neinvertující vstup. Do tohoto bloku jsou dále zapojeny tranzistory M3 a M4, které tvoří proudové zrcadlo. Aplikace proudového zrcadla si v elektrotechnice našla oblibu hlavně tam, kde je potřeba použít zdroje konstantních proudů nebo proudové opakovací. Zároveň plní funkci vysoko-ohmových rezistorů. Tato aplikace je vhodná především z důvodu menšího využitého prostoru na čipu. O proudovém zrcadle se dá

všeobecně říci, že se jedná o zdroj proudu, který je řízený proudem. Jedná se o zapojení dvou stejných tranzistorů M3 a M4. Tranzistor M3 je zapojen v diodovém zapojení, pro měření vstupního referenčního proudu. Toto napětí určuje potom hodnotu  $U_{GS1}$  a také nastavuje pracovní bod tranzistoru M4 [18].

## 2.4.2 Druhý stupeň

Druhý stupeň je v zapojení ziskového stupně. Jeho hlavní podstatou je zapojení tří tranzistorů s vodivostí typu P v případě tranzistoru M5 a vodivosti typu N v případě tranzistorů M6 a M7. Hlavním úkolem druhého stupně je získat dostačující zesílení. Tranzistor M5 je současně v zapojení se společným sourcem. Zapojení se společným sourcem může být nazváno jako transkonduktanční zesilovač, popřípadě zesilovač napětí. Z pohledu transkonduktančního zesilovače je vstupní napětí vnímáno jako upravený proud, který teče do zátěže. V případě napětového zesilovače, vstupní napětí upravuje proud, který teče přes tranzistor. Šířka pásma u tohoto zapojení bývá malá vzhledem k velké vyplývající kapacitě Millerovy kompenzace. Nedostatkem zapojení se společným sourcem by mohlo být omezení vysokofrekvenční odezvy. Proto se v praxi mnohem více využívají zapojení se společným drainem či se společným gatem [18].

Tab. 2.1 Klasifikace jednotlivých stupňů



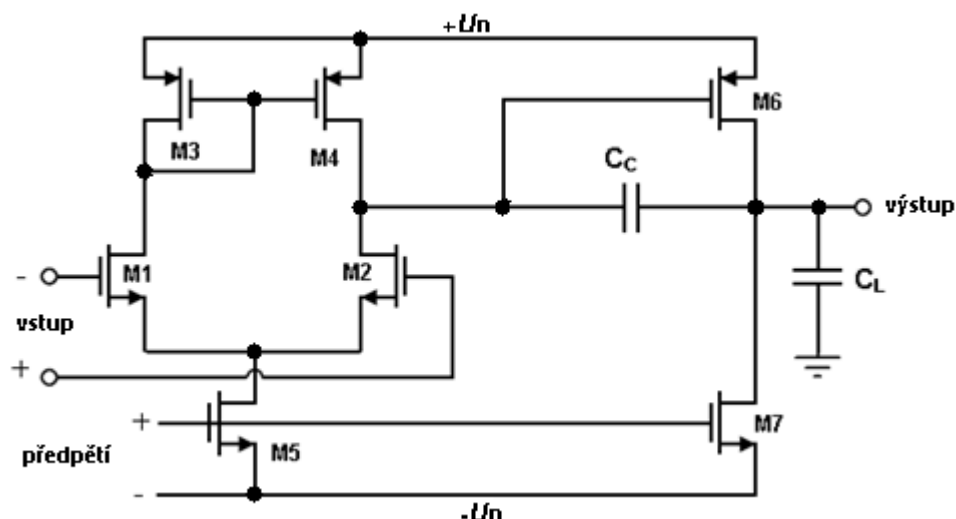
## 2.5 Určení vhodné kompenzace

Úkolem kompenzace je dosáhnout stabilní funkce OZ při zapojení se zápornou zpětnou vazbou. Kompenzace jsou rozděleny do tří skupin

- Millerova kompenzace používá v záporné zpětné vazbě s vysokým zesílením kapacitory,
  - pouze Millerova kapacita,
  - Millerova kapacita s jednotkovým zesílením na blok. Tato náhrada vypouští použití nulového rezistoru,
  - Millerova kapacita s nulovým rezistorem. Toto řešení je podobné Millerově kapacitě s přidanou nulovou resistencí na regulaci zisku,
- samokompenzace – zatěžovací kapacita kompenzuje OZ,
- kladná zpětná vazba – překlenutí kladné zpětné vazby u OZ vede k fázovému předbíhání. Zesílení může být menší než jedna [1].

### 2.5.1 Millerova kapacita

Kompenzace je založena na základě zapojení kapacity z výstupu na vstup druhého stupně strmosti  $g_{m1}$ . Na Obr. 2.5 je znázorněn obvod s Millerovou kapacitou,



Obr. 2.5 Obvod s Millerovou kapacitou

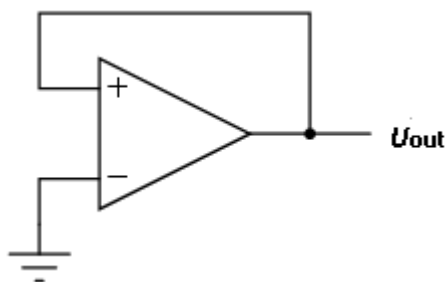
kde  $C_C$  je Millerova kapacitní kompenzace obvodu a  $C_L$  zatěžovací kapacita na výstupu.

## 2.5.2 Samokompence

Hlavním problémem u samotné samokompence je analýza dotování. Z toho důvodu by se mohlo zdát, že dotující materiál by zároveň mohl i určovat stupeň této kompenzace. Ukazatelem by mohl být přirozený polovodič typu P, kde donory jsou kompenzovány převážně přirozenými iontovými poruchami. Na druhou stranu dotování dovoluje výrazně zvýšit děrovou koncentraci.

## 2.5.3 Kladná zpětná vazba

Zpětná vazba (ZV) je termín pro situaci kdy výstup nějakého systému ovlivňuje zpětně jeho vstup. Pokud zvýšení hodnoty, přiváděné z výstupu na vstup, způsobí další zvýšení hodnoty na výstupu, jedná se o kladnou zpětnou vazbu. Pokud je navíc výsledné zesílení celého cyklu větší než 1, může výstupní hodnota systému nekontrolovatelně růst. Obvykle tento růst samozřejmě narazí na omezení daná charakterem systému, v němž vazba probíhá. Kladná zpětná vazba je dalším způsobem kompenzace OZ. Na rozdíl od záporné zpětné vazby, kde je napěťová ZV přivedena na invertující výstup, je u kladné ZV napěťový výstup přiveden na vstup neinvertující a invertující výstup je přiveden na zemní svorku viz obr. 2.6.



Obr. 2.6 Zapojení kladné zpětné vazby

## 2.6 Teoretický postup při navrhování

Pro samotný návrh OZ je důležitý výpočtový vztah, ze kterého se odvíjí výpočty tranzistorů. Tento návrh je poměr šířky a délky kanálu u tranzistorů [1]

$$S_i = \frac{W_i}{L_i} = \frac{W}{L}, \quad (2.1)$$

kde  $S_i$  je poměr mezi šířkou  $W$  a délkou  $L$ .

Pro další výpočty je třeba vycházet z předpokladu, že všechny tranzistory jsou v saturaci. Jedinou výjimku může tvořit tranzistor M4, který může být dostaven do saturace pomocí vnitřního nastavení napětí a proudu [1].

➤ Rychlost přeběhu

$$SR = \frac{I_5}{C_C}, \quad (2.2)$$

kde rychlost přeběhu je rovna podílu proudu  $I_5$  protékajícího tranzistorem  $T_5$  a kompenzační kapacity  $C_C$  [1].

➤ Zesílení prvního stupně zesilovače

$$A_{V1} = \frac{-g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}} = \frac{-2g_{m1}}{I_5(\lambda_2 + \lambda_4)}, \quad (2.3)$$

kde  $g_{m1}$  je transkonduktance tranzistoru M1,  $g_{ds}$  je vstupní dynamická vodivost,  $I_5$  proud tekoucí do prvního stupně a  $\lambda$  je parametr modulace délky kanálu.

- Zesílení druhého stupně zesilovače

$$A_{V2} = \frac{-g_{m6}}{g_{ds6} + g_{ds7}} = \frac{-g_{m6}}{I_6 (\lambda_6 + \lambda_7)}. \quad (2.4)$$

- Šířka pásma

$$GBW = A \cdot f, \quad (2.5)$$

kde  $GBW$  je šířka pásma,  $A$  je zesílení a  $f$  pracovní kmitočet snižený o 3dB.

- Vstupní kladný napěťový rozsah

$$U_{in(MAX)} = U_{DD} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_3}} - |U_{T1(MAX)}| + U_{T1(MIN)}, \quad (2.6)$$

kde  $U_{in(max)}$  je vstupní kladný napěťový rozsah,  $U_{DD}$  kladné napájecí napětí,  $\beta$  je zesilovací činitel a  $U_T$  prahové napětí tranzistoru [1].

- Vstupní záporný napěťový rozsah

$$U_{in(MIN)} = U_{SS} + \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} + U_{T1(max)} + U_{DS5(sat)}, \quad (2.7)$$

kde  $U_{in(min)}$  je vstupní záporný napěťový rozsah,  $U_{ss}$  záporné napájecí napětí a  $U_{DS}$  napětí na tranzistoru mezi elektrodami drain a source [1].

- Saturační napětí

$$U_{DS(SAT)} = \sqrt{\frac{2I_{DS}}{\beta}}, \quad (2.8)$$

kde  $I_{DS}$  je proud tekoucí mezi drainem a sourcem



- Celkové zesílení

$$A_0 = \frac{2g_{m1}g_{m6}}{I_5(\lambda_2 + \lambda_3)I_6(\lambda_6, \lambda_7)} . \quad (2.9)$$

- Spotřeba zapojení

$$P = (I_5 + I_6)(U_{DD} + |U_{SS}|) . \quad (2.10)$$

### 3 Teoretický návrh OZ

V prvé řadě je důležité mít stanovené základní parametry, od kterých se pozdější návrh odvíjí. Parametry jsou vybrány na základě průzkumu používaných parametrů v projektech, které byly zmíněny v kapitole 1.2. Na základě prostudování těchto materiálů byly vybrány obdobné parametry pro vlastní návrh OZ. Tyto parametry jsou patrné z tab. 3.1.

Tab. č. 3.1 Základní elektrické parametry

specifikace	hodnota
zesílení otevřené smyčky $A$	55 dB
šířka pásma $GBW$	5 MHz
$U_{DD}$	2,5 V
zatěžovací kapacita $C_L$	10 pF
rychlost přeběhu $SR$	$> 10 \text{ V}/\mu\text{s}$
výstupní rozkmit	$\pm 2 \text{ V}$
$ICMR$	$\pm 1,5 \text{ V}$
$U_{SS}$	-2,5 V
délka kanálu $L$	1 $\mu\text{m}$
spotřeba $P$	1 mW

Ze stanovené minimální délky kanálu byly stanoveny další parametry pro vlastní výpočty. Parametry jsou pevně svázané s technologickou metodou viz tab. č. 3.2.

Tab č. 3.2. Technologické parametry s minimální délkou kanálu 0,7  $\mu\text{m}$

parametry	$L_{\min} [\mu\text{m}]$	prahové napětí $U_{TH}[\text{V}]$	proudový faktor KP [ $\text{A}/\text{V}^2$ ]
PMOS	0,7	-1	$0,9 \cdot 10^{-4}$
NMOS	0,7	0,76	$3,3 \cdot 10^{-5}$

Počátek návrhu směřuje na odvození kompenzačního kapacitoru  $C_C$  ze zatěžovacího kapacitoru  $C_L$ . Z požadavku fázové rezervy, která má být nejméně  $45^\circ$  optimálně  $60^\circ$  bude vycházeno ze vztahu

$$C_C > 0,22 \cdot C_L \quad (3.1)$$

potom,

$$C_C > 0,22 \cdot 10 \cdot 10^{-12} > 2,2 \text{ pF.}$$

Dosazením do vzorce byla získána hodnota 2,2 pF, bude uvažována hodnota 3 pF.

Dále je nutné určit proud  $I_5$  tekoucí do prvního stupně

$$I_5 = SR \cdot C_C, \quad (3.4)$$

potom,

$$I_5 = 1 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot 10^{-12} = 30 \text{ } \mu\text{A}.$$

Následně je možné dopočítat hodnotu šířky kanálu pro tranzistor M3

$$\left(\frac{W}{L}\right)_3 = \frac{I_5}{K P_3 [U_{DD} - |U_{TH3}|_{(\max)} + |U_{TH1}|_{(\min)}]^2}, \quad (3.5)$$

potom

$$\left(\frac{W}{L}\right)_3 = \frac{30 \cdot 10^{-6}}{(33 \cdot 10^{-6})[2,5 - 2 - 1 + 0,76]^2} = 16 \text{ } \mu\text{m}.$$

Protože tranzistory M3 a M4 jsou stejné, platí stejná šířka i pro tranzistor M4.

V dalším kroku je nutné dopočítat hodnotu transkonduktance  $g_{m1}$ , ze které potom lze dopočítat i hodnoty tranzistorů M1 a M2

$$g_{m1} = GBW \cdot 2\pi \cdot C_C, \quad (3.6)$$

potom

$$g_{m1} = 5 \cdot 10^6 \cdot 2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-12} = 94,25 \text{ } \mu\text{S}.$$

Nejdříve je nutné dopočítat hodnotu proudu  $I_1$ , který je roven poloviční hodnotě proudu  $I_5$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = \frac{I_5}{2}. \quad (3.7)$$

Šířka kanálu tranzistoru M1 je dána vztahem

$$\left(\frac{W}{L}\right)_1 = \frac{g_{m1}^2}{2 K P_1 I_1}, \quad (3.7)$$

potom

$$\left(\frac{W}{L}\right)_1 = \frac{(94,25)^2}{2 \cdot 90 \cdot 15} = 3,3 \mu m.$$

Rozměr šířky kanálu je rovněž stejný i pro tranzistor M2.

Další hodnotou, kterou je nutné dopočítat je napětí mezi sourcem a drainem na tranzistoru M5. Pro výpočet bude vycházeno ze

$$U_{DS5} = U_{in(min)} - U_{SS} - \sqrt{\frac{I_5}{\beta_1}} - U_{TH1}, \quad (3.8)$$

potom

$$U_{DS5} = (-1) - (-2,5) - \sqrt{\frac{(30 \cdot 10^{-6})}{(90 \cdot 10^{-6}) \cdot 3,3}} - 0,76 = 0,42 V.$$

Vypočtením hodnoty  $U_{DS5}$  je možné dopočítat i hodnotu šířky kanálu tranzistoru M5

$$\left(\frac{W}{L}\right)_5 = \frac{2I_5}{K P_5 [U_{DS5}]^2}, \quad (3.9)$$

potom

$$\left(\frac{W}{L}\right)_5 = \frac{2(30 \cdot 10^{-6})}{(90 \cdot 10^{-6})(0,42)^2} = 4 \mu m.$$

V dalším kroku je nutné dopočítat transkonduktance  $g_{m6}$  a  $g_{m4}$ , ze kterých bude dopočtena hodnoty šířky kanálu tranzistoru M6. Transkonduktance  $g_{m6}$  je dána

$$g_{m6} \geq 10 g_{m1} \geq 942,5 \mu S. \quad (3.10)$$

Vypočtením hodnoty transkonduktance  $g_{m6}$  na hodnotu  $942,5 \mu S$  a hodnoty  $g_{m4} 150 \mu S$  potom bude dopočtena hodnoty šířky kanálu tranzistoru M6

$$\left(\frac{W}{L}\right)_6 = \left(\frac{W}{L}\right)_4 \frac{g_{m6}}{g_{m4}}, \quad (3.11)$$

potom

$$\left(\frac{W}{L}\right)_6 = 16 \frac{942,5}{150} = 100 \mu m.$$

Dále bude dopočtena hodnota proudu  $I_6$  ze

$$I_6 = \frac{g_{m6}^2}{2KP_6 \cdot U_{DS}}, \quad (3.12)$$

potom

$$I_6 = \frac{(942,5 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot (33 \cdot 10^{-6}) \cdot (100)} = 134,6 \approx 135 \mu A.$$

Získáním hodnoty proudu  $I_6$  je možné dopočítat poslední šířku kanálu tranzistoru M7

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = \left(\frac{W}{L}\right)_5 \frac{I_6}{I_5}, \quad (3.13)$$

potom

$$\left(\frac{W}{L}\right)_7 = 4 \frac{(135 \cdot 10^{-6})}{(30 \cdot 10^{-6})} = 18 \mu m.$$

Tímto jsou dopočítány všechny potřebné hodnoty. Nyní budou ověřeny hodnoty výstupního napětí  $U_{out}$ , výkonových ztrát  $P_{diss}$  a zesílení  $A_0$ .

Pro ověření výstupního napětí bude dosazeno do vzorce

$$U_{min(out)} = U_{DS7(SAT)} = \sqrt{\frac{2I_6}{KP_7 \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_7}}, \quad (3.14)$$

potom

$$U_{min(out)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 135}{90 \cdot 18}} = 0,408 V.$$

V dalším kroku bude ověřena hodnoty výkonové ztráty, která bude počítána dosazením do vzorce (2.10)

$$P_{diss} = 5 \cdot (30 \cdot 10^{-6} + 135 \cdot 10^{-6}) = 0,825 mW.$$

Naposledy bude ověřeno zesílení, které bude dopočítáno dosazením do vzorce (2.9)

$$A_0 = \frac{(2)(94,25 \cdot 10^{-6})(942,5 \cdot 10^{-6})}{(30 \cdot 10^{-6})(0,04 + 0,05)135 \cdot 10^{-6}(0,04 + 0,05)} = 5416 \frac{V}{V} \approx 66dB.$$

Hodnoty rozměrů tranzistorů byly vloženy do přehledové tabulky č. 3.3. Pro ověření zapojení bylo vycházeno z minimální délky kanálu o hodnotě 1  $\mu\text{m}$ .

Tab. 3.3. Vypočtené hodnoty rozměrů tranzistorů

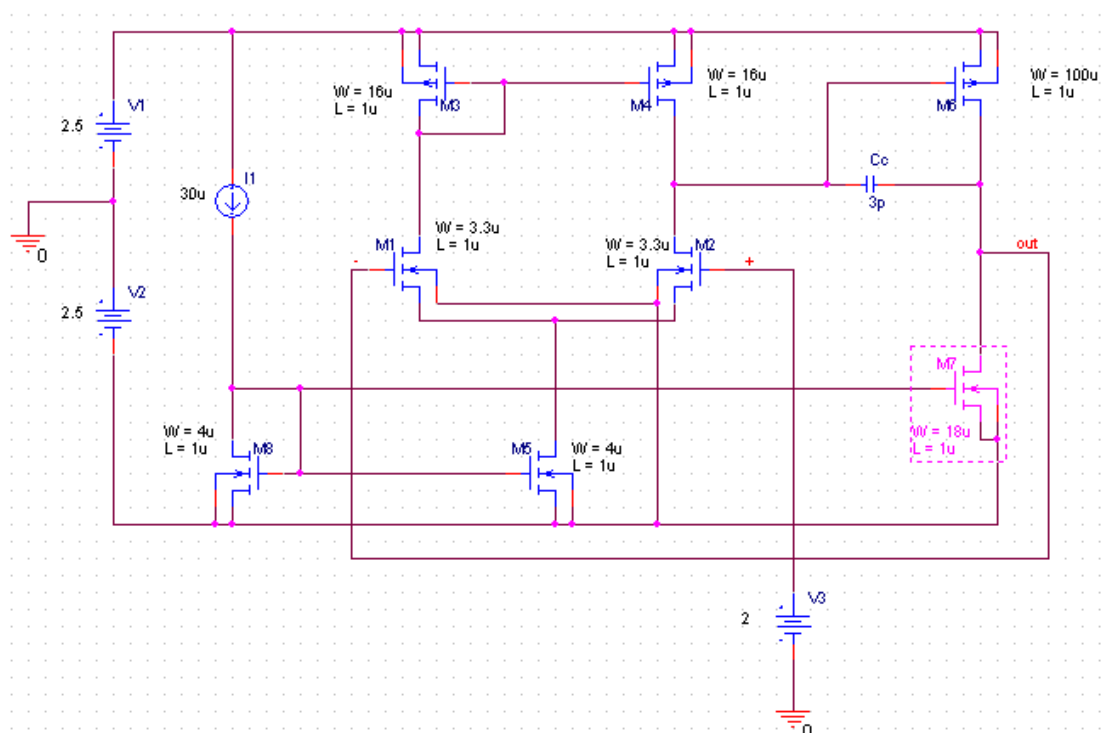
rozměry tranzistorů		
tranzistor	délka kanálu $L$ [ $\mu\text{m}$ ]	šířka kanálu $W$ [ $\mu\text{m}$ ]
M1	1	3,3
M2	1	3,3
M3	1	16
M4	1	16
M5	1	4
M6	1	100
M7	1	18
M8	1	4

## 4 Ověření funkce navrženého OZ

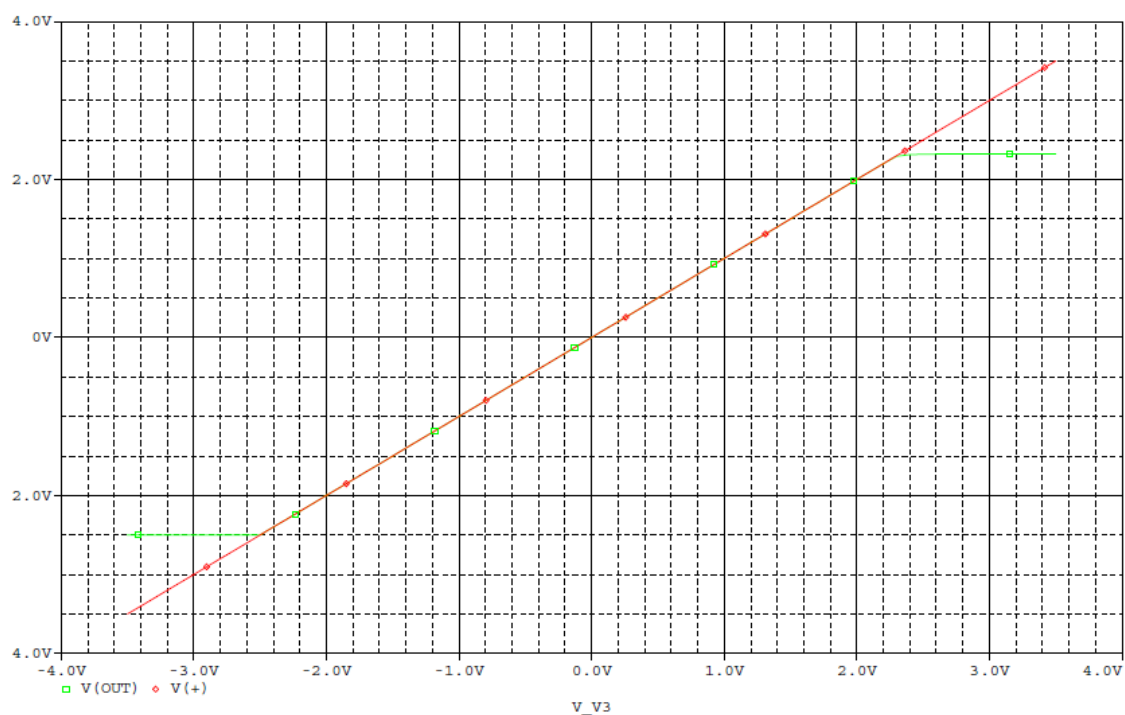
Kapitola se zabývá samotným ověřením návrhu. Nejprve budou ověřeny základní funkce OZ, jakými jsou vstupní napěťový rozsah, napěťová nesymetrie, rychlost přeběhu, šířka pásma a fázové rezervy. Na závěr bude ověřena funkce zapojení v závislosti na změně teploty. Teploty byly v rozmezí -20, 0, 20, 60 a 120 °C.

### 4.1 DC analýza a vstupní napěťová nesymetrie

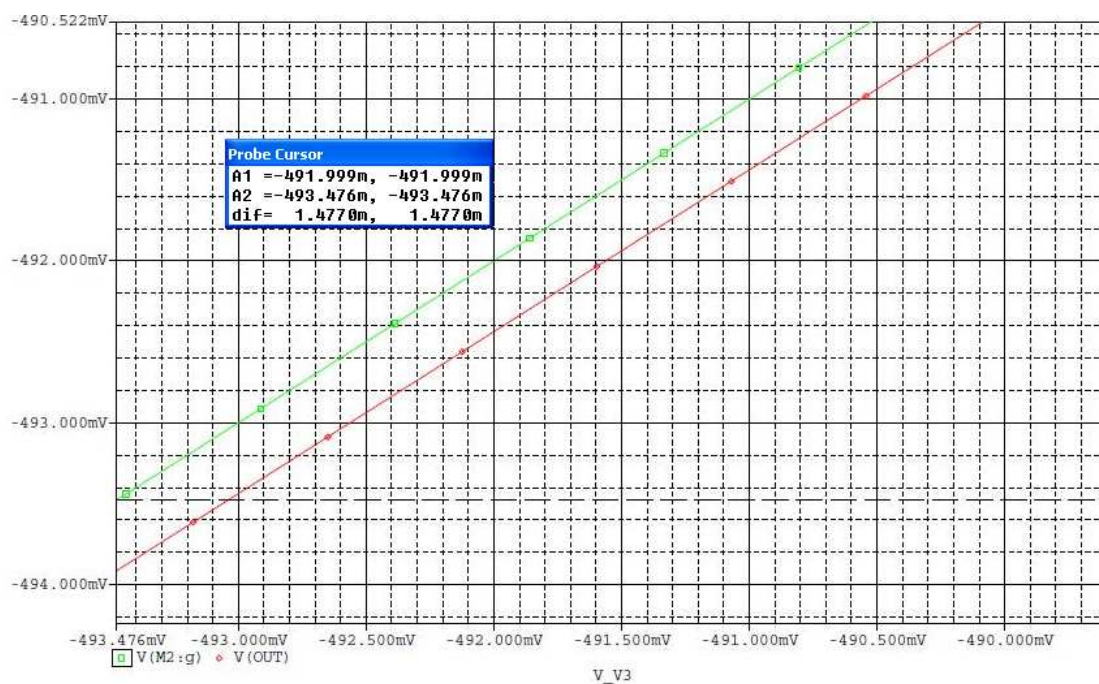
Na gate tranzistoru M2 je připojen stejnosměrný napěťový zdroj. Invertující výstup tranzistoru M1 bude zapojen na výstup mezi tranzistory M6 a M7. Na neinvertující výstup bude zapojen stejnosměrný zdroj napětí, který bude rozmítán od počáteční hodnoty - 3,5 V do koncové hodnoty + 3,5 V s přírůstkem 0,1 V.



Obr. 4.1 Zapojení obvodu pro měření DC analýzy



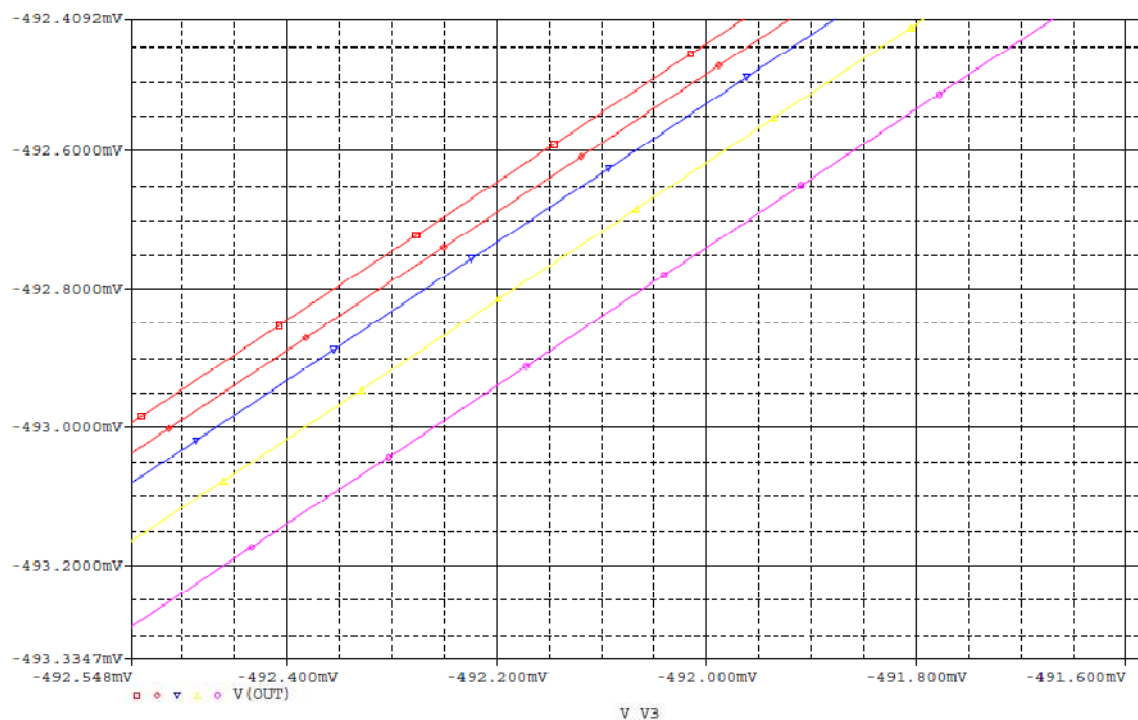
Obr. 4.2 Analýza napěťového sledovače



Obr. 4.3 Vstupní napěťová nesymetrie

Z obr. 4.3 je patrná vstupní napěťová nesymetrie, která je rovna 1,477 mV. Obr. 4.4 ukazuje vstupní napěťovou nesymetrii v závislosti na předvolených teplotách.

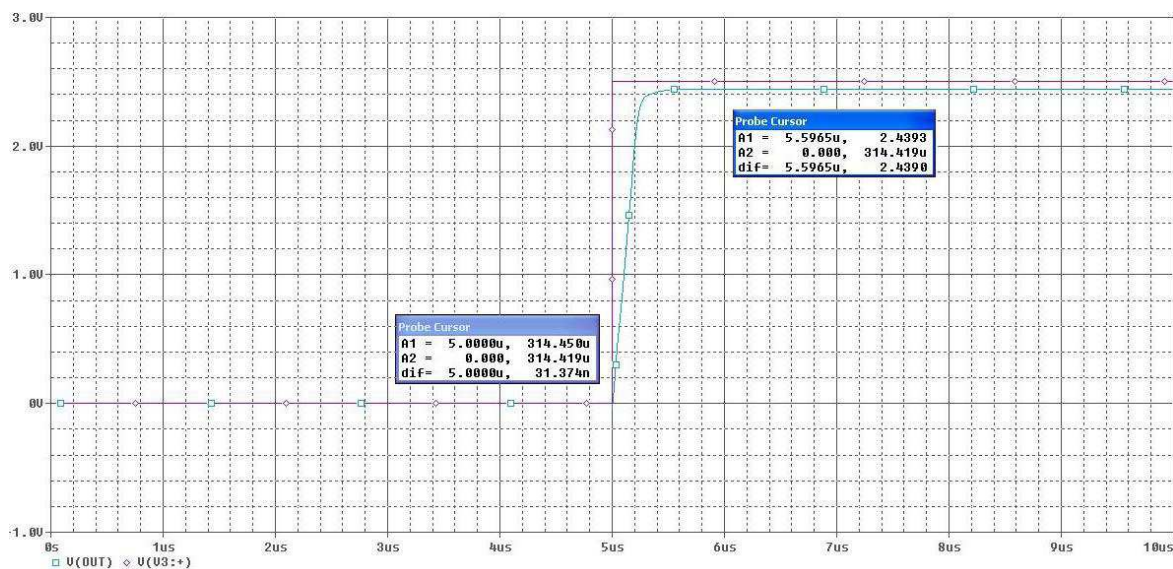




Obr. 4.4 Vstupní napěťová nesymetrie v závislosti na teplotě

## 4.2 Rychlost přeběhu

Pro toto měření bude pozměněno zapojení. Jedná se o část napěťového zdroje na neinvertujícím výstupu, který bude vyměněn za zdroj pulzní. V této simulaci bylo měřeno zpoždění a  $SR$ , které je patrné z obrázku. Hodnoty byly voleny tak, aby byl patrný rozdíl mezi ideálním stavem a stavem simulovaným. Mezi hodnoty  $4,95 \mu s$  a  $5,05 \mu s$  byl rozdíl již patrný a také dobře měřitelný.



Obr. 4. 5. Rychlost přeběhu

Z uvedených hodnot lze dopočítat rychlost přeběhu, která je stanovena jako

$$SR = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{2,439-0}{(5,597 \cdot 10^{-6}) - (5,000 \cdot 10^{-6})} = 4,09 \text{ V}/\mu\text{s}, \quad (5.1)$$

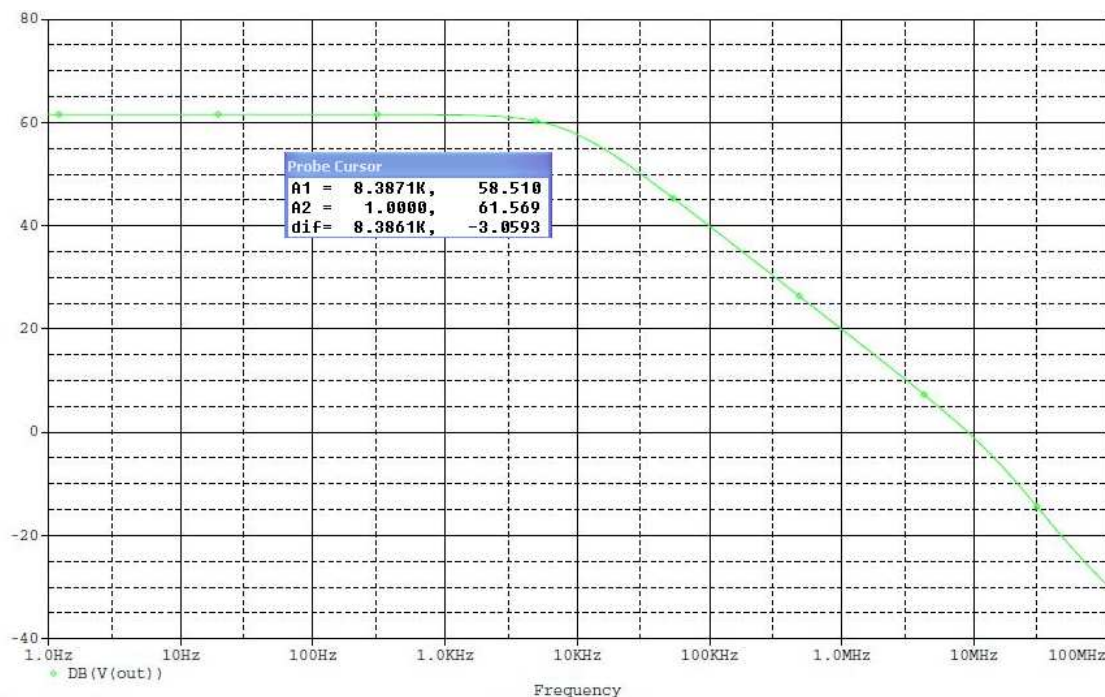
kde  $\Delta U$  je změna velikosti napětí na změně času  $\Delta t$ .

### 4.3 Šířka pásma, zisk a fázová rezerva

Pro ověření šířky pásma bylo zapojení modifikováno. Invertující výstup byl připojen přímo na zemnicí svorku a na výstup zesilovače byl připojen zatěžovací kondenzátor, přičemž měření bylo provedeno se střídavým napětíovým zdrojem.

### 4.3.1 Šířka pásma

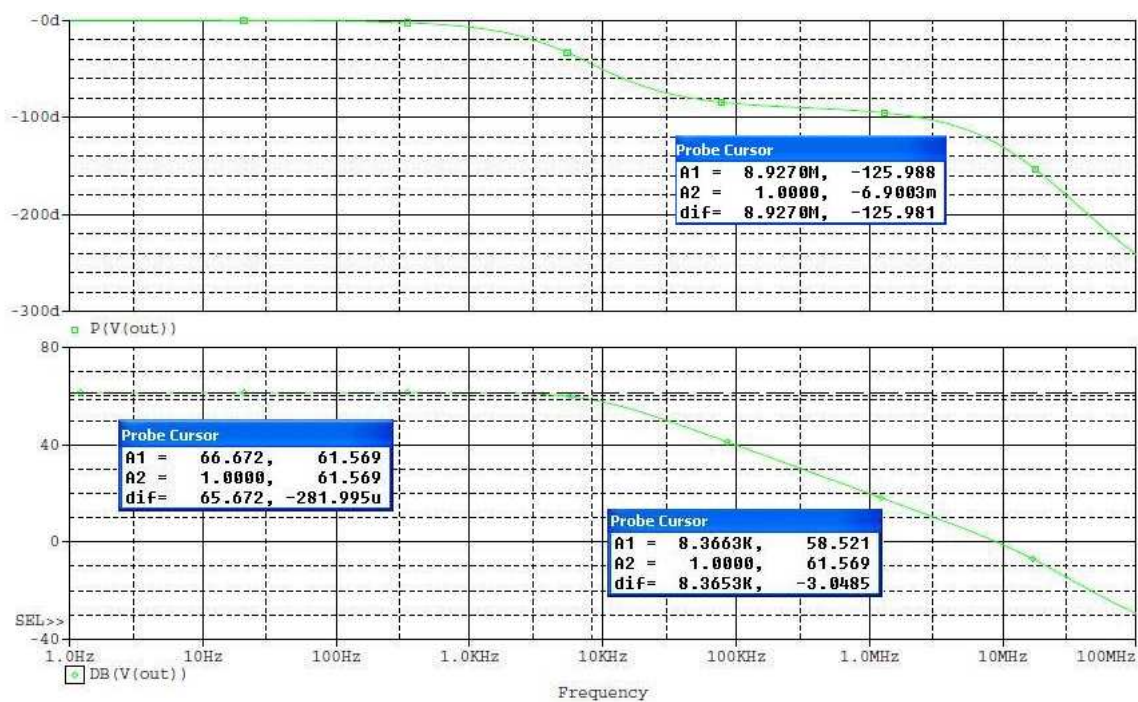
Při ověřování se ukázalo, že zesílení OZ s otevřenou smyčkou dosahuje hodnoty 58,5 dB a jednotková šířka pásma  $BW$  8,38 kHz, které jsou viditelné na obr. 4.5. Zatím co vlastní šířka pásma  $GBW$  je odečítána z grafu v místě, kde křivka zesílení prochází hodnotou 0 dB (napěťové zesílení je rovno 1).



Obr. 4.6 Zesílení a šířka pásma s otevřenou smyčkou

### 4.3.2 Fázová rezerva a zisk

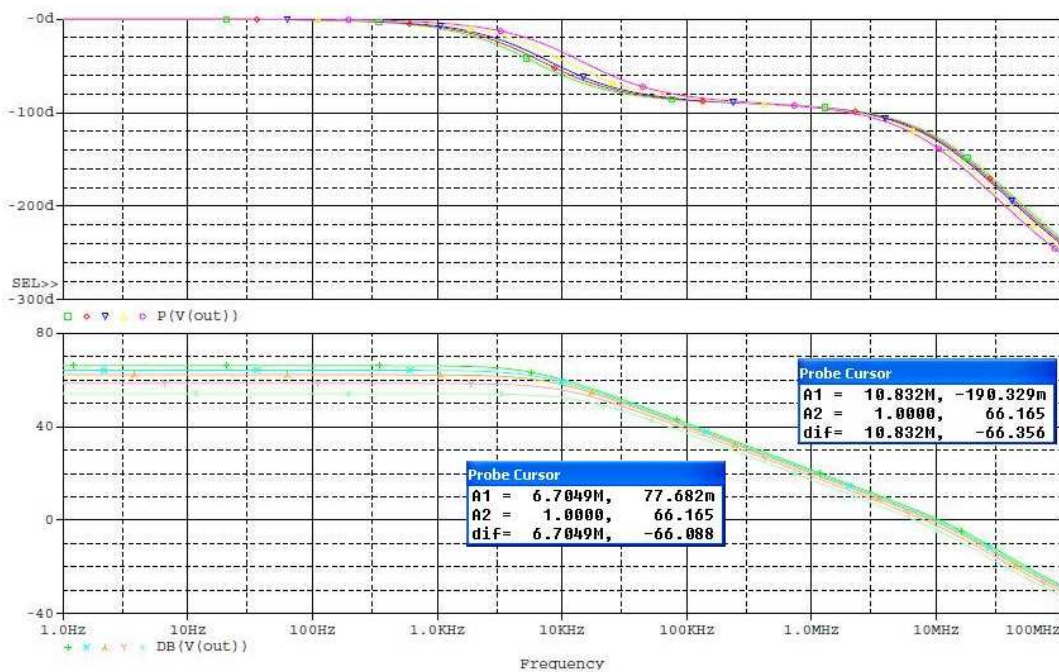
Jak již bylo výše zmíněno, dobrá fázová rezerva je důležitým parametrem pro stabilitu celého systému. Při ověření bylo pro toto zapojení ověřena fázová rezerva s výslednou hodnotou 54°. Tato hodnota je dostačující.



Obr. 4.7 Ověření fázové rezervy

Na obr. 4.7 je možné odečíst hodnotu fázové rezervy, která je rovna rozdílu hodnoty  $180^\circ$  a hodnoty, která byla odečtena při hodnotě 0 dB. Výsledná fázová rezerva je rovna

$$PM = 180 - 126 = 54^\circ.$$



Obr. 4.8 Ověření fázové rezervy a šířky pásma v závislosti na teplotě

Na obr. 4.8 je znázorněna změna parametrů zesilovače v závislosti na teplotě. Je patrné, že se zvyšující se teplotou se posouvají i hladiny šířky pásma  $GBW$  a s tím spojené i fázové rezervy  $PM$ .

Naměřené hodnoty jsou shrnuty v přehledové tabulce č. 4.1, kde je možné je porovnat s hodnotami stanovenými na začátku návrhu.

Tab. 4.1 Teoretické a ověřené hodnoty

specifikace	teoretické hodnoty	ověřené hodnoty
zesílení otevřené smyčky $A$	50 dB	58,5 dB
šířka pásma $GBW$	5 MHz	8,927 MHz
$U_{n+}$	2,5 V	2,5 V
zátěžovací kapacita $C_L$	10 pF	10 pF
rychlost přeběhu $SR$	10 V/ $\mu$ s	4,09 V/ $\mu$ s
výstupní rozkmit	$\pm 2$ V	- 2,5 V až 2,39 V
vstupní souhlasný rozsah $ICMR$	$\pm 1,5$ V	neověřeno
$U_{n-}$	- 2,5 V	- 2,5 V
délka kanálu $L$	1 $\mu$ m	1 $\mu$ m
Spotřeba $P_{diss}$	> 1 mW	0,825 mW

## 5 Závěr

Předmětem této bakalářské práce byl návrh a ověření funkce jednoduchého dvoustupňového OZ v technologii CMOS. V první kapitole byl rozebírán vývojový trend z hlediska výroby OZ od počátků, který je datovaný do 40. let dvacátého století. V této době byly OZ konstruovány pomocí elektronek, zatímco v současnosti jsou v podobě malých součástek v monolitickém pouzdře. V současnosti je hlavní snahou snižování napájecího napětí a celkové spotřeby celého obvodu. Další inovací ve světě mikroelektroniky a vlastní konstrukce miniaturních součástek je bezesporu používání stále nových materiálů, které dovolují snižování výrobních rozměrů až na vlastní hranici velikosti atomu či molekul. Zároveň byly zmíněny i dvě možné technologie pro výrobu, které jsou SIO řešení nebo implementace více elektrod gate do struktury. V hlavní části práce je popisována mnou zvolená metoda řešení a výpočty jednotlivých parametrů obvodu. Počáteční hodnoty potřebné pro teoretický návrh byly získány prostudováním různých projektů, které se zabývaly podobnou strukturou dvoustupňového OZ. Vlastní OZ je rozdělen do dvou stupňů, kde první stupeň je tvořen diferenčním párem s aktivní zátěží v podobě proudového zrcadla a druhý stupeň je v modifikaci ziskového zapojení. Jako vhodná kompenzace pro zajištění dobré fázové rezervy obvodu byla použita Millerova kapacita. Návrh byl uvažován s minimální délkou kanálu tranzistorů s rozměrem  $0,7\text{ }\mu\text{m}$ , ze kterého se odvodily potřebné technologické parametry pro výrobu. Ověření obvodu bylo provedeno za pomoci programu OrCad PSpice, kde byly ověřeny vypočtené teoretické parametry. Ověřením návrhu se ukázalo, že navržené teoretické parametry jsou ve skutečnosti v případech zesílení  $A$  lepší o  $8,5\text{ dB}$ , šířka pásma  $GBW$  o skoro  $4\text{ MHz}$ . Vstupní napěťový rozkmit byl ověřen pomocí DC analýzy, který rovněž ukázal lepší parametry oproti teoretickým. Parametr rychlosti přeběhu byl při ověření nižší, než bylo ve skutečnosti požadováno. Celý návrh byl v rámci ověřování otestován i za použití pěti různých teplot okolí, které měli ukázat vliv na výstupní parametry zesilovače. Na závěr byla dopočtená teoretická spotřeba celého zapojení, která vyšla nižší, než bylo stanoveno. Tato práce měla přiblížit základní vývojové trendy od počátků až po současnost a přiblížit jeden ze způsobů výpočtů parametrů jednoduchého dvoustupňového OZ, které byly ověřeny a shrnuty do přehledné tabulky.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] ALLEN E. Phillip, HOLBERG R. Douglas: CMOS analog circuit design, OXFORD University press, ISBN 0-19-511644-5
- [2] RAZZAVI Behzad: Design of analog CMOS integrated circuits, ISBN 0-07-238032-2
- [3] MUSIL Vladislav, PROKOP Roman: Návrh analogových integrovaných obvodů, elektronická skripta, VUT FEKT Brno
- [4] JAKOVENKO Jiří: Návrh integrovaných obvodů skripta, ČVUT Praha
- [5] 48th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Cincinnati, Ohio, U.S.A., 7-10 August, 2005
- [6] IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 38, NO. 6, JUNE 2003
- [7] SODOGAR H. Amir: Analysis of bipolar and CMOS amplifiers, CRC press, ISBN 978-1-4206-4644-1
- [8] BEZDĚK Miroslav: Elektronika I učebnice, KOPP nakladatelství České Budějovice, 2006, ISBN 80-7232-171-4
- [9] PUNČOCHÁŘ Jan: Operační zesilovače v elektronice II. vydání, BEN – technická literatura, Praha 1996, ISBN 80-901984-3-0
- [10] 48th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Cincinnati, Ohio, U.S.A., 7-10 August, 2005
- [11] HERSHENSON Maria del Mar , BOYD P. Stephen , LEE H. Thomas : Optimal Design of a CMOS Op-amp via Geometric Programming, Stanford University Stanford CA 94305



- [12] BAKER R. Jacob: CMOS: circuit design, layout, and simulation
- [13] RAIRICH Daniel, *Student Member, IEEE*: Limits of CMOS Technology Scaling and Technologies Beyond-CMOS
- [14] IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 34, NO. 3, MARCH 1999, Microwave CMOS—Device Physics and Design
- [15] Historie OZ, [http://en.wikipedia.org/wiki/Operational\\_amplifier](http://en.wikipedia.org/wiki/Operational_amplifier)
- [16] Op Amp History, elektronický text,  
[http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/39-05/web\\_chh\\_final.pdf](http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/39-05/web_chh_final.pdf)
- [17] PARIHAR S.Rajkumar , GUPTA Anu: Design of a Fully Differential Two-Stage CMOS Op-Amp for High Gain, High Bandwidth Applications
- [18] BEČVÁŘ Daniel, STEHLÍK Jiří: Návrh analogových integrovaných obvodů, elektronická skripta, BRNO, 1.10.2006
- [19] HE Chenging , CHEN Degang and GEIGER Randal: A low-voltage compatible two-stage amplifier with  $\geq 120$  dB gain in standard digital CMOS Iowa State Univerzity, Ames, Iowa 50011,USA, elektronický text
- [20] CHEN YAllen, MONAT Pavel: A fully differential Two-stage CMOS operational amplifier, EECS 240 term project, Profesor B.E.Boser, Spring 2003
- [21] Design of fully differential op-amp, elektronický text.